CN 53-1189/P ISSN 1672-7673

日冕物质抛射的偏转特性研究*

王林萍，王华宁，黄 鑫
(中国科学院国家天文台，北京 100012)

摘要：日冕物质抛射(CME)是巨大的、携带磁力线的泡沫状气体，在几个小时中被从太阳抛射出来的过程。日冕物质抛射伴随着大量带电粒子和辐射的释放，这些物质进入日地空间，对日地空间的磁场造成很大扰动；当它们传播到地球附近时，则严重影响地球的磁场，产生磁暴，也对空间和地面的电子设备造成干扰。日冕物质抛射在传播过程中如果发生偏转，将影响它对地有效性。因此研究日冕物质抛射的偏转特性，对预报日冕物质抛射对日地空间的影响具有重要意义。主要利用 2007 年 10 月 8 日 STEREO 卫星的日冕物质抛射观测资料，结合全日面线性无力场模型(Global Linear Force-Free Field，GLFFF)进行磁场外推，分析日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度分布之间的关系，并计算日冕物质抛射的运动轨迹。通过改变无力因子 α，发现当 $\alpha=0.15$ 时，计算得到的日冕物质抛射运动轨迹与实际观测的日冕物质抛射运动轨迹拟合得最好。

关键词：日冕物质抛射；偏转；背景磁场；运动轨迹
中图分类号：P182.62 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2016)02-0143-07

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection，CME)是一种与空间天气具有紧密联系的太阳活动，表现为在几分钟到几小时内从太阳向外抛射一团日冕物质[1]。这些抛射物质进入日地空间，对日地空间的磁场造成很大扰动，当它们传播到地球附近时，严重影响地球磁场，产生地磁暴，也对通讯设备、卫星导航、卫星运行造成干扰[2]。

日冕物质抛射传播速度的快慢可能是造成伴生射电爆发差异的原因之一[3]。日冕物质抛射传播方向的改变可能导致日冕物质抛射能否到达地球，因此研究日冕物质抛射的偏转对预报空间天气事件具有重要意义。由于单点观测的条件限制，只能得到日冕物质抛射在子午面内的投影情况。目前已经有许多学者研究了日冕物质抛射在子午面内的偏转。文[4]研究了天空实验室上观测的日冕物质抛射的偏转，并发现日冕物质抛射的偏转可能影响地磁效应。文[5]在研究日冕物质抛射在子午面内偏转时发现，日冕物质抛射在太阳活动低年时对称地偏向赤道，而在太阳活动峰年没有这种偏转现象。文[6]进一步研究了太阳活动低年时(1997~1998)所有日冕物质抛射事件的偏转情况，也得到了同样的结论。

学者们提出了几种可能影响日冕物质抛射偏转的因素：日冕物质抛射之间的碰撞和相互作用、冕洞内发出的高速太阳风、背景日冕磁场。在日冕物质抛射之间的碰撞和相互作用方面，文[7-8]通过研究发现，日冕物质抛射之间的碰撞和相互作用可能显著地影响日冕物质抛射的形状、速度以及传播方向。文[9]做数值模拟研究了两个日冕物质抛射相互作用过程，发现它们均发生纬度上的偏转。文[10]通过分析 2007 年 1 月 24 日、25 日观测到的日冕物质抛射资料，发现两个日冕物质抛射相互碰撞后分别发生东西方向的偏转。文[11]指出日冕物质抛射的速度和方向都会因日冕物质抛射之间的相互作用而改变。在冕洞内发出的高速太阳风方面，文[12]研究发现日冕物质抛射在行星际空间传播时受 Parker 螺旋型太阳风影响发生偏转。同样，文[13-14]指出日冕物质抛射在行星际的传播过程

* 基金项目：国家自然科学基金（11303051）；国家重点基础研究发展计划（973 计划）（2011CB811406）资助.
收稿日期：2015-05-11；修订日期：2015-05-25
作者简介：王林萍，女，硕士. 研究方向：天体物理. Email：lpwang@nao.cas.cn

中，可能存在经度方向的偏转，这种偏转主要是由于日冕物质抛射和背景 Parker 螺旋型太阳风的作用造成的。文[15]也认为有些日冕物质抛射在行星际传播的过程中，可能受其源区附近冕洞发出的高速太阳风影响，偏离日地连线。在背景磁场方面，文[15]研究发现背景磁场 B 是另一个冕洞影响日冕物质抛射偏转的因素，当磁场方向与日冕物质抛射传播方向平行时，日冕物质抛射将发生偏转。文[16]发现 $B2$ 比 B 能更好地表示导致日冕物质抛射偏转的因素。同时，文[17-18]更深入地研究了日冕物质抛射偏转与背景磁场磁能密度梯度的关系。但是，文[19]研究背景磁场密度梯度与日冕物质抛射的运动轨迹没有直接的物理相关性。因此本文在定量地描述日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度梯度分布之间关系的基础上，计算日冕物质抛射的运动轨迹，同时通过改变无力因子 α 寻找通过理论外推得到的日冕物质抛射偏转与实际观测得到的日冕物质抛射偏转拟合得更好的情况。

本文的第 1 节介绍日冕物质抛射事件的观测资料，第 2 节结合全日面线性无力场模型(Global Linear Force-Free Field，GLFFF)进行磁场外推，在定量描述日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度梯度分布之间关系的基础上，计算日冕物质抛射的运动轨迹。第 3 节通过改变无力因子 α 寻找理论计算的日冕物质抛射偏转与实际观测的日冕物质抛射偏转拟合得更好的情况。第 4 节是结论。

1 观 测

本文选取的观测案例是 2007 年 10 月 8 日的日冕物质抛射事件，此案例曾经被许多人研究过[17]。这个日冕物质抛射事件是在太阳活动低年发生的，受太阳风的影响较小，因此本文在研究影响日冕物质抛射偏转因素方面不考虑日冕物质抛射受太阳风的影响，同时这个日冕物质抛射事件的特点是过程时间长，这样更有助于研究日冕物质抛射偏转的全过程。

日冕物质抛射事件首次出现在 STEREO COR1-B 视野内的时间是 2007 年 10 月 8 日 08:46UT。STEREO 卫星有足够高的分辨率，因此可以通过 STEREO 卫星清晰地观测它在子午面内的偏转过程。如图 1，日冕物质抛射在子午平面内投影随时间的演化过程。图(a)~(f)为日冕物质抛射在 COR1 视野内的图像，图(g)~(i)为日冕物质抛射在 COR2 视野内的图像。图(a)上点 1 表示日冕物质抛射的上边缘位置点，点 2 表示日冕物质抛射下边缘位置点，点 3 表示日冕物质抛射的前边缘位置点。

由图(a)~(f)可以看出，日冕物质抛射在传播前期(COR1)，其传播方向不断靠近太阳赤道平面，在纬度方向发生明显的偏转，而在传播后期(COR2)，其传播方向基本沿径向传播，没有发生纬度方向的偏转。如图(g)~(i)。

图 2 给出了 2007 年 10 月 8 日日冕物质抛射事件在子午面内传播的中心位置角随前边缘高度的变化。图中标记“+”表示日冕物质抛射的中心位置角变化。当日冕物质抛射传播到 4Rs 附近时，其前沿出现弥散，这样对测量结果造成误差，因此没有获取日冕物质抛射在 4~6.5Rs 内的数据。从图中可以看出，日冕物质抛射在早期传播阶段(0~4Rs)，其传播方向不断向低纬度变化，在这个传播过程中，中心位置角大约从 306°到 275°。由于弥散原因，在图 2 中出现了数据间断，但是根据前边缘高度在 4Rs 和 6.5Rs 处的纬度差，推测该事件在这个传播过程中，仍向低纬度地区发生偏转。当前边缘高度在 6.5Rs 以后，其中心位置不再发生明显的变化，表明日冕物质抛射近似于径向传播。

2 背景磁场对日冕物质抛射偏转的影响

日冕物质抛射在纬度方向上的偏转已被许多学者研究，并提出了几种可能影响日冕物质抛射偏转的因素：日冕物质抛射之间的碰撞和相互作用、冕洞内发出的高速太阳风、背景日冕磁场[13,15,19]。本文在定量描述日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度梯度分布之间关系的基础上，计算日冕物质抛射的运动轨迹。

2.1 日冕物质抛射在背景磁场作用下的偏转模型

日冕物质抛射在传播时，经过的背景磁场被压缩，压缩后产生了磁能堆积，这种磁能堆积产生的

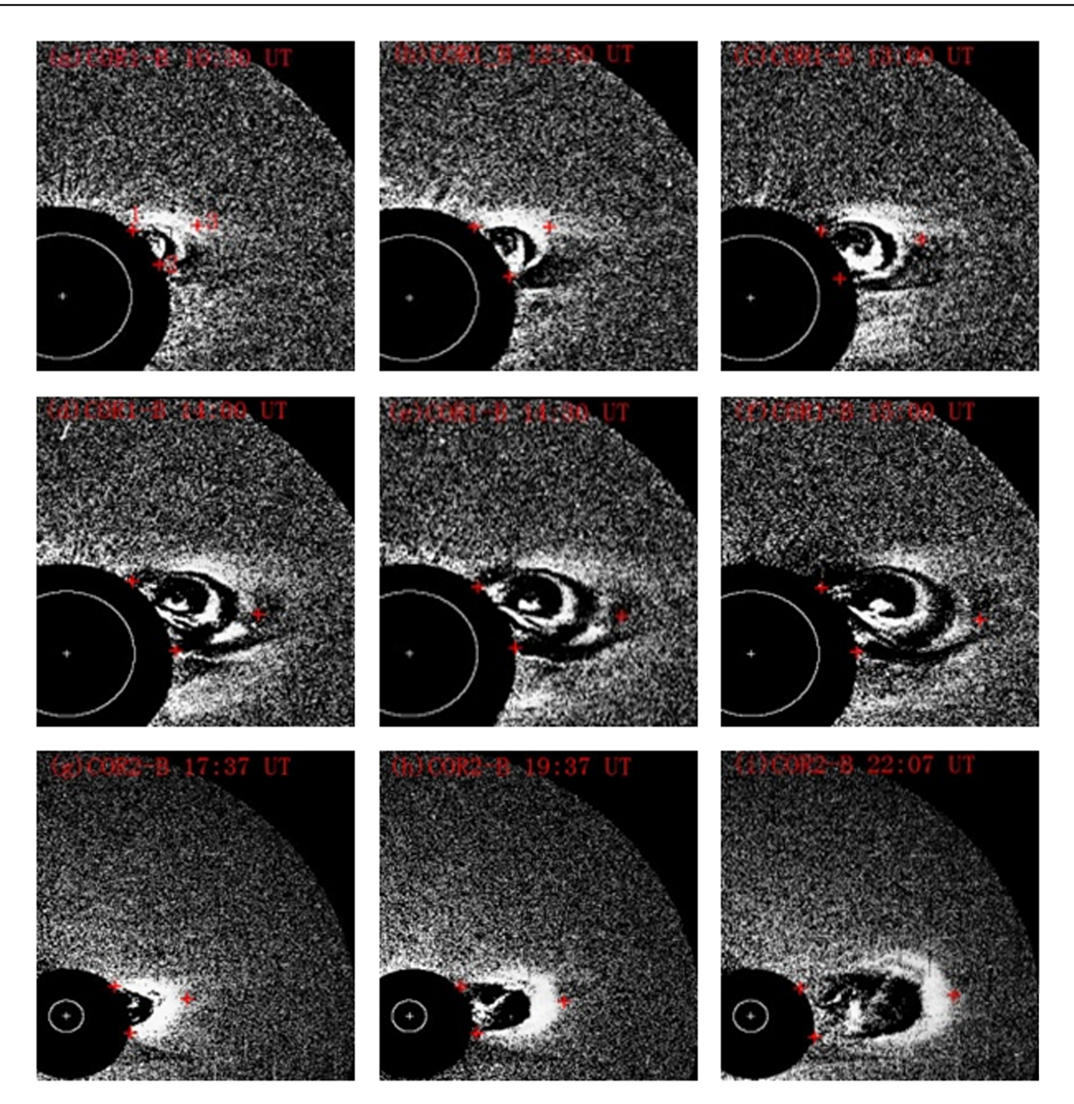


图 1　日冕物质抛射在子午平面内投影随时间的演化过程

Fig. 1　The evolutionary process of CME projected in the meridian plane with time

力作用在日冕物质抛射上，使其发生偏转。假设日冕物质抛射所占区域足够小，那么背景磁场对日冕物质抛射的作用所产生的合力即为日冕物质抛射所在位置的磁能密度梯度力，如(1)式，其中 B 是背景磁场磁感应强度；μ 是磁导率。

$$F = -\nabla\left(\frac{B^2}{2\mu}\right). \tag{1}$$

图 3 给出了背景磁场对日冕物质抛射偏转的影响的简图。被日冕物质抛射上部分扰动的背景磁场磁能密度为 ω_{U}，作用在上部分的恢复力为 $\frac{\omega_{\mathrm{U}}\Delta V_{\mathrm{U}}}{L_{\mathrm{U}}}$，同理作用在下部分日冕物质抛射上的恢复力为$\frac{\omega_{\mathrm{L}}\Delta V_{\mathrm{L}}}{L_{\mathrm{L}}}$。假设日冕物质抛射上下部分所占背景磁场区域的体积相同($\Delta V_{\mathrm{U}} = \Delta V_{\mathrm{L}}$)，其特征

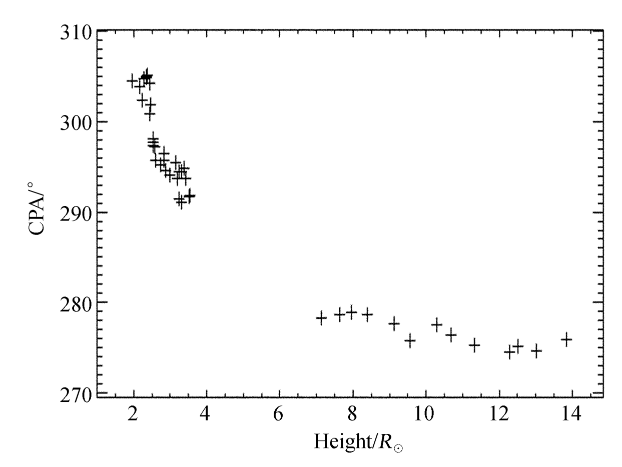


图 2　日冕物质抛射的中心位置角(CPA)随日冕物质抛射前边缘高度的变化

Fig. 2　CME Central Position Angle (CPA) varied with CME leading edge height

尺度也相同($\Delta L_U = \Delta L_L$)，那么作用在日冕物质抛射上的合力如(2)式。这样，背景磁场对日冕物质抛射偏转的影响只取决于上下边界磁能密度差。

$$f = \frac{\omega_U \Delta V_U}{L_U} - \frac{\omega_L \Delta V_L}{L_L} = \frac{\Delta V}{L}(\omega_U - \omega_L) = \frac{\Delta V}{L}\Delta\omega \, . \tag{2}$$

2.2 2007 年 10 月 8 日日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度梯度分布

为了研究背景磁场磁能密度梯度对日冕物质抛射偏转的影响，首先要得到背景日冕磁场的分布情况。由于日冕磁场的测量极其困难，为了获得日冕磁场的详细信息，只能通过对光球测量的磁场进行外推。本文利用文[20]提出的全日面线性无力场模型计算背景磁场磁能密度分布情况。这种外推方法在光球层磁图基础上计算全日面日冕势场或线性无力场，它对于分析局部太阳活动现象比如日冕物质抛射的偏转等比势场模型具有更好的适用性。

图 4 给出了 2007 年 10 月 8 日日冕物质抛射事件对应的第 2 061 卡林顿活动周在 3*R*s(3 个太阳半径)处的背景磁场磁能密度分布情况。图 4 中虚线表示磁能密度最低的时候；十字表示在这个高度下日冕物质抛射的位置；图中椭圆表示日冕物质抛射在卡林顿磁图上的投影，这个椭圆实际上是直径为 30°的圆，在这里假定日冕物质抛射在传播过程中形状不变(以角宽度为 30°的圆)。虚线和实线分别表示日冕物质抛射的上边界和下边界。

从图 4 中可以看出在不同纬度，背景磁场的磁能密度分布不均匀。在日冕物质抛射投影的上下边界，背景磁能密度有很大的差异，日冕物质抛射上边界的背景磁场磁能密度大于下边界的背景磁场磁能密度，因此恢复力合力方向向下指向低纬度地区，大小由边界上的磁能密度的差值决定。

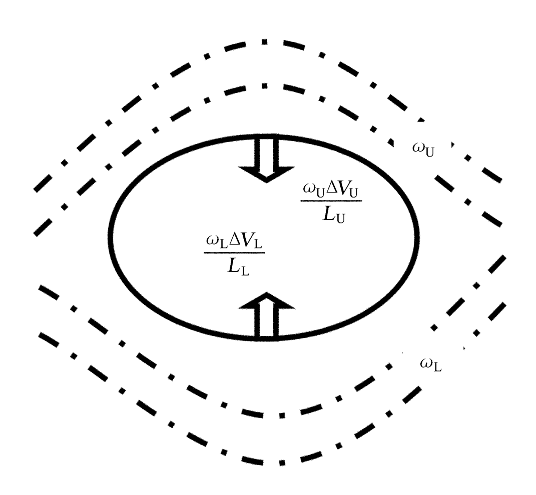


图 3 被日冕物质抛射扰动的背景磁场的简图

Fig. 3 Sketch of the CME-perturbed background magnetic field

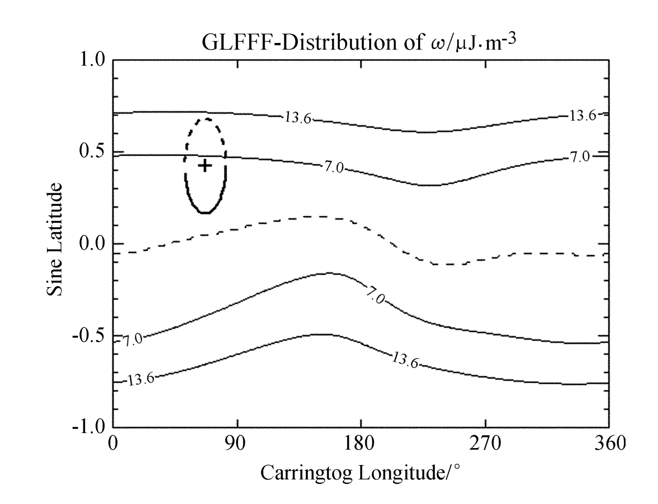


图 4 在 $\alpha=0$ 时，第 2061 卡林顿活动周在 $R=3Rs$ 处的磁能密度分布情况

Fig. 4 $\alpha=0$, distribution of the magnetic-energy density [ω] of carrington rotation 2061 at the height of 3Rs

图 5 显示了日冕物质抛射和磁能密度差值随高度的变化。图中三角形“△”表示在 $\alpha=0$ 时，磁能密度差随前边缘高度的变化，菱形“◇”表示中心位置角随前边缘高度的变化。由图 5 可以看出，日冕物质抛射运动方向变化和磁能密度差变化趋势基本一致。在较低的高度上(COR1 中)，磁能密度差较大，日冕物质抛射的偏转较为明显，而当日冕物质抛射传播到较高区域时(COR2)，磁能密度差较小，并接近于 0，此时日冕物质抛射不再发生明显的偏转。

2.3 计算日冕物质抛射的运动轨迹

在之前的工作中得到了日冕物质抛射偏转与背景磁场能量密度梯度分布之间的关系，在这里日冕物质抛射上下边界的磁能密度差即为作用在日冕物质抛射上的恢复力 F。由于恢复力 $F=ma$，日冕物质抛射的质量 m 假定在传播过程中保持不变，这样 $\Delta\omega$ 与加速度 a 成正比，并利用公式 $\theta_i=\theta_{i-1}+\nu_{i-1}t+$

$1/2at^2$ 计算得到日冕物质抛射的偏转轨迹。

图 6 显示在 $\alpha=0$ 时日冕物质抛射的理论运动轨迹与实际观测得到的运动轨迹。在图 6 中“△”表示实际观测得到的日冕物质抛射的运动轨迹，“ * ”表示理论计算得到的日冕物质抛射的运动轨迹。

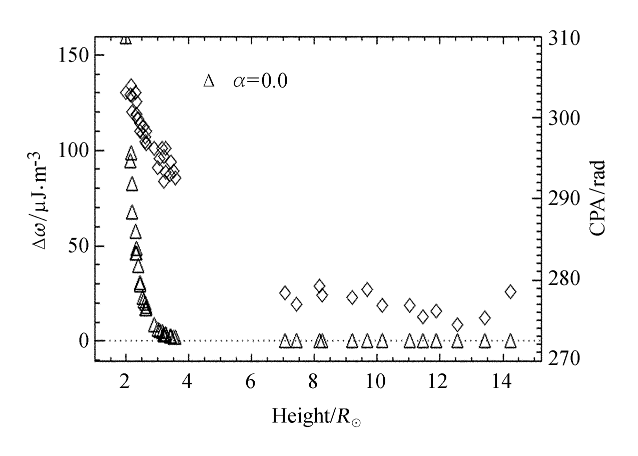


图 5　日冕物质抛射运动方向和磁能密度差值随高度的变化

Fig. 5　Δω and CPA varied with leading edge height

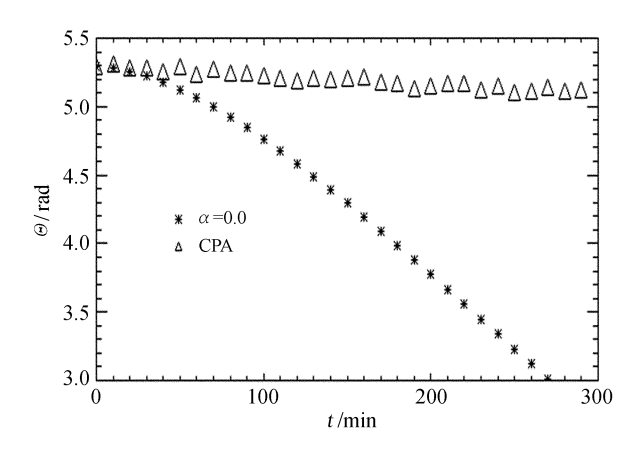


图 6　在 $\alpha=0$ 时日冕物质抛射的理论运动轨迹与实际观测得到的运动轨迹

Fig. 6　$\alpha=0$, the theoretical trajectory of CME and the observed trajectory of CME

3　结果分析与讨论

现在通过改变无力因子 α，寻找理论计算得到的日冕物质抛射偏转与实际观测得到的日冕物质抛射偏转拟合得更好的情况。在这里，无力因子 α 单位是 $1/Rs$。

图 7 显示在不同 α 时，理论计算的日冕物质抛射运动轨迹与实际观测的运动轨迹。图 7 中三角形“Δ”表示观测的日冕物质抛射运动方向(CPA)随时间的变化；图中“ * ”表示 $\alpha=0.0$、“+”表示 $\alpha=0.10$、“×”表示 $\alpha=0.15$、“◇”表示 $\alpha=0.20$ 时理论上得到的日冕物质抛射运动方向(θ)随时间的变化。从图 7 可以看出在背景磁场是线性无力场时，实际观测的日冕物质抛射运动轨迹与理论计算得到的运动轨迹拟合得更好。

表 1 是给定不同的 α 值，通过计算得到的日冕物质抛射的角度与观测得到的中心位置角间的绝对误差(平均值)。

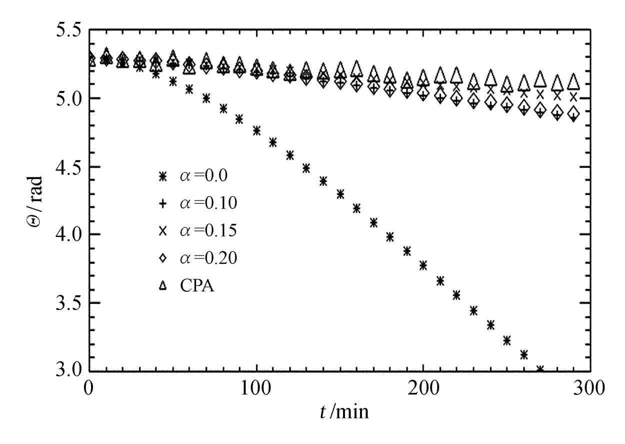


图 7　不同 α 时，理论计算的日冕物质抛射运动轨迹与实际观测的运动轨迹

Fig. 7　Different α, the theoretical trajectory of CME and the observed trajectory of CME

表 1　理论上的 θ 与观测到的 CPA 间的绝对误差(平均值)

Table 1　Absolute error between theoretical θ and observed CPA on average

α	绝对误差/%
$\alpha=0.05$	8.7
$\alpha=0.10$	9.8
$\alpha=0.15$	3.9
$\alpha=0.20$	8.7
$\alpha=0.30$	13.3
$\alpha=0.40$	55.0
$\alpha=0.50$	12.6
$\alpha=0.60$	92.1

4 结 论

本文对 2007 年 10 月 8 日 STEREO 卫星观测的日冕物质抛射事件进行研究，发现日冕物质抛射受背景磁场磁能密度梯度影响在传播前期向低纬度地区发生偏转，在后期基本沿着径向传播。通过比较不同 α 值时日冕物质抛射的理论运动轨迹与实际观测运动轨迹，发现当背景磁场是线性无力场时，计算得到的日冕物质抛射运动轨迹与实际观测的日冕物质抛射运动轨迹拟合得更好，在 $\alpha=0.15$ 时它们拟合得最好，当 α 超过 0.2 时误差将变得很大。

以上的研究结果进一步证明了日冕物质抛射与背景磁场的密切关系，也说明从日冕物质抛射和背景磁场磁能密度梯度关系入手进行日冕物质抛射的运动轨迹预报研究工作在一定程度上是可行的。但结果仍有需要改进的地方，最主要是计算日冕物质抛射上下边界磁能密度差的时候，假定日冕物质抛射在传播过程中形状(以 30°角宽度为半径的圆)保持不变，因此存在一定的误差。未来主要利用实际观测数据在日冕物质抛射的上下边界取点，再计算它的背景磁场磁能密度梯度，这样会减少理论估计带来的误差，提高预报工作的准确度。

参考文献：

[1] Hundhausen A J, Sawyer C B, House L, et al. Coronal mass ejections observed during the solar maximum mission: latitude distribution and rate of occurrence [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 1984, 89(A5): 2639-2646.

[2] 谢瑞祥, 汪敏, 颜毅华, 等. 日冕物质抛射及其伴生的射电辐射观测特征 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2011, 8(2): 95-101.
Xie Ruixiang, Wang Min, Yan Yihua, et al. Observational characteristics of CME events and associated radio emission [J]. Astronomical Research and Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2011, 8(2): 95-101.

[3] 谢瑞祥, 龚玲平, 施硕彪. 不同速度日冕物质抛射的多波段射电观测特征 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2008, 5(1): 13-20.
Xie Ruixiang, Gong Lingping, Shi Shuobiao. Observational characteristics of multi-wavelength radio emissions [J]. Astronomical Research and Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2008, 5(1): 13-20.

[4] Macqueen R M, Hundhausen A J. The propagation of coronal mass ejection transients [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 1986, 91(A1): 31-38.

[5] Cremades H, Bothmer, V. On the three-dimensional configuration of coronal mass ejections [J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 422(1): 307-322.

[6] Wang Yuming, Chen Caixia, Gui Bin, et al. Statistical study of CME source locations: understanding CMEs viewed in coronagraphs [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2011, 116 (A4): 1451-1453.

[7] Wang Y M, Wang S, Ye P Z. Multiple magnetic clouds in interplanetary space [J]. Solar Physics, 2002, 211(1): 333-344.

[8] Wang Y M, Ye P Z, Wang S. Multiple magnetic clouds: several examples during March-April 2001 [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2003, 108(A10): 519-522.

[9] Xiong Ming, Zheng Huinan, Wang Shui. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 114(A11): 1-14.

[10] Lugaz N, Vourlidas A, Roussev I I. Deriving the radial distances of wide coronal mass ejections from elongation measurements in the heliosphere-application to CME-CME interaction [J]. Annales Geophysicae, 2009, 27(9): 3479-3488.

[11] Temmer M, Vrsnak B, Rollett T. CME-CME interaction during the 2010 August 1 events [J]. Copernicus, 2012, 14: 1677.

[12] Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000 [J]. Astrophysical Jouranal, 2003, 582(1): 520-533.

[13] Wang Y M, Shen C L, Wang S, et al. Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium [J]. Solar Physics, 2004, 222(2): 329-343.

[14] Wang Yuming, Zhou Guiping, Ye Pinzhong, et al. A study of the orientation of interplanetary magnetic clouds and solar filaments [J]. The Astrophysical Jouranal, 2006, 651(2): 1245-1255.

[15] Gopalswamy N, Mäkelä P, Xie H, et al. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2009, 114 (A3): 266-288.

[16] Gopalswamy N, Mäkelä P, Xie H, et al. Solar sources of "Driverless" interplanetary shocks [C] // AIP Conference Proceedings. 2010: 452-458.

[17] Shen Chenglong, Wang Yuming, Gui Bin, et al. Kinematic evolution of a slow CME in corona viewed by STEREO-B on 8 October 2007 [J]. Solar Physics, 2011, 269(2): 389-400.

[18] 桂彬. 日冕物质抛射在太阳大气中的运动学研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学空间物理教研室, 2011.

[19] Shen F, Wu S T, Feng X S, et al. Acceleration and deceleration of coronal mass ejections during propagation and interaction [J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2012, 117 (A11): 1-12.

[20] Jiang Chaowei, Feng Xueshang. A unified and very fast way for computing the global potential and linear force-free fields [J]. Solar Physics, 2012, 281(2): 621-637.

A Study on Deflection Characteristics of Coronal Mass Ejection

Wang Linping, Wang Huaning, Huang Xin

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China, Email: lpwang@nao.cas.cn)

Abstract: Coronal Mass Ejection (CME) is the process that huge amount of foamy gas which carries the magnetic field lines, is projected from the sun in a few hours. CME releases high levels of radiation and a large number of charged particles which will cause great disturbances to the Sun-Earth magnetic field when they travel to the vicinity of the Earth. CME is the driven source of the geomagnetic storms and moderate solar energetic particle events. The change of CME propagation direction determines whether a CME could arrive on Earth. Therefore, to study the deflection of CME could offer a better understanding about its affections to space weather, which is significant to predict space weather events. This paper analyzes the deflection data of CME observed by STEREO satellite on the 8 October 2007. It uses the Global Linear Force-Free Field model to extrapolate magnetic field and analyzes the relationship between the distribution of the background magnetic energy density and the deflection of CME. The trajectory of CME is calculated. The result shows that the theoretical trajectory of CME fit the actual observations most closely when the force free parameter $\alpha = 0.15$.

Key words: CME; Deflection; Background magnetic field; Trajectory